

ных (ТИМ'2013) с международным участием (28–29 марта 2013 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 93–102.

6. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поковок / Д. И. Спитченко, М. Д. Казяев, А. М. Вохмяков, Е. В. Киселев, Д. М. Казяев // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (18–21 сентября 2012 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 367–370.

УДК 669.18

**Л. В. Камкина, А. Г. Величко**

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И АНАЛИЗЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ**

### **Аннотация**

*Приведены дифференциальные уравнения, описывающие окислительные и восстановительные процессы, к безразмерному виду. Установлено, что в качестве характеристики скоростей окисления и восстановления элементов может быть использовано соответствующее число Дамкелера –  $Da_{[i]}$ . Величины чисел Дамкелера для углерода и кислорода в сталеплавильных процессах близки к единице, т. е. скорости реакций окисления и переноса одного порядка. При физико-химическом моделировании нестационарного состояния сталеплавильных процессов следует учитывать масштаб модели.*

*Ключевые слова: металлургические процессы; массообмен и теплообмен; дифференциальные уравнения переноса; число Дамкелера; потоки кислорода и углерода.*

### **Abstract**

*Differential equations describing the oxidation and reduction processes to dimensionless form. It is established that, as the characteristic velocity of oxidation and reduction elements can be used by appropriate Damköhler –  $Da_{[i]}$ . Values Damköhler number for carbon and oxygen in the steelmaking process are close to unity, oxidation reaction rate and the transfer of the same order. When physico-chemical modeling of unsteady state of steelmaking processes should take into account the scale of the model.*

*Keywords: metallurgical processes, mass transfer and heat transfer, differential transport equations, the number Damköhler; streams of oxygen and carbon.*

Металлургические процессы по своей природе представляют сложный комплекс газогидродинамических, тепломассообменных и физико-химических процессов, происходящих в плавильных агрегатах. Как отмечалось в трудах В. Е. Грум-Гржимайло, И. Д. Семикина: «Начинает и ведет печной процесс теплотехника, а заканчивает его технология. Теплотехни-

ческий и технологический процессы нужно вести при взаимной увязке друг с другом. Технолог должен знать теплотехнику, иначе он не достигнет наилучших результатов».

В плавильных агрегатах происходят эндо- и экзотермические реакции, изменяющие тепловой баланс печного агрегата. Разработка любого металлургического процесса начинается с оценки затрат теплоты на процесс с учетом всех фазовых превращений исходных материалов. По физико-химической сущности металлургические процессы обычно разделяют на восстановительные и окислительные, хотя их основу составляют окислительно-восстановительные реакции. При их исследовании широко используются методы теории подобия, позволяющие как обобщать наблюдаемые явления, так и осуществлять их физическое моделирование.

Наиболее широко физическое моделирование используется при изучении газогидродинамических [1] и тепломассообменных [2; 3] процессов в сталеплавильных агрегатах, где основное взаимодействие осуществляется между газовой и жидкими фазами. В восстановительных процессах, главным образом в доменном, методами подобия изучается распределение шихтовых материалов в объемах агрегатов [4] и газодинамические процессы [5]. Исследование металлургических процессов методами физико-химического подобия ограничивается проведением качественного, так называемого «горячего моделирования» [6], однако методика использования этого метода в металлургии разработана еще недостаточно.

Подобие любых процессов характеризуется безразмерными комплексами – критериями подобия. Одним из наиболее распространенных методов установления критериев подобия изучаемого явления является приведение соответствующих дифференциальных уравнений, описывающих процесс, к безразмерному виду. В зависимости от характера изучаемого физико-химического процесса такие уравнения должны содержать члены, описывающие скорости образования (расходования) вещества в результате химической реакции и массообмен в реакционном пространстве или скорости выделения (поглощения) теплоты при протекании химической реакции и тепломассообмен в этом пространстве.

В сталеплавильных процессах основное взаимодействие веществ происходит в газах, жидких шлаке и металле и на границах между ними. Одной из основных реакций, определяющих ход процесса и массообмен между фазами, является окисление углерода. В качестве исходных взяты уравнения скорости окисления углерода и переноса углерода и кислорода в металле, выраженные через эффективный коэффициент диффузии –  $D_{\text{э}}$ , с источниковыми членами, описывающими потребление кислорода на реакцию обезуглероживания [7]. Принято, что реакции окисления примесей протекают в квазигомогенном режиме; скорость потребления кислорода пропорциональна его концентрации, разности фактической и равновесной концентраций окисляемого элемента и эффективной константе скорости соответствующей реакции –  $k$ .

Система уравнений с распределенными параметрами в одномерном пространстве переноса углерода и кислорода в металле имеет вид

$$\frac{\partial [\text{O}]}{\partial \tau} = D_{\text{э}} \frac{\partial^2 [\text{O}]}{\partial x^2} - k_{\text{с}} [\text{O}] ([\text{C}] - [\text{C}]_{\text{р}}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial [\text{C}]}{\partial \tau} = D_{\text{э}} \frac{\partial^2 [\text{C}]}{\partial x^2} - b k_{\text{с}} ([\text{C}] - [\text{C}]_{\text{р}}), \quad (2)$$

где  $b$  – стехиометрический коэффициент, индекс «р» относится к равновесной концентрации.

Концентрации элементов выражены в мольных долях. На границе шлак-металл для кислорода принято граничное условие третьего рода  $b_{\text{ш}} (L_O a_{\text{FeO}} - [\text{O}]) = D_{\text{э}} \partial [\text{O}] / \partial x$ , где  $b_{\text{ш}}$  – коэффициент массопередачи на границе шлак-металл,  $L_O$  – константа распределения кислорода между металлом и шлаком,  $a_{\text{FeO}}$  – активность FeO в шлаке. Переход к безразмерным переменным осуществлен путем представления их в виде отношений разности текущего и минимального к разности максимального и минимального значения величин. За минимальные значения координаты и концентрации кислорода принят ноль, углерода – равновесная его концентрация с кислородом; за максимальные – соответственно, глубина ванны  $H$ , равновесная концентрация с чистым FeO и начальное содержание углерода –  $[\text{C}]_{\text{н}}$ . Исходя из этого можно записать  $\eta = x/H$ ,  $\rho_O = [\text{O}]/L_O$ ,  $\rho_C = ([\text{C}] - [\text{C}]_{\text{р}}) / ([\text{C}]_{\text{н}} - [\text{C}]_{\text{р}})$ , где  $\eta$  – безразмерная координата,  $\rho_O$  и  $\rho_C$  – безразмерные концентрации  $[\text{O}]$  и  $[\text{C}]$ . После соответствующей замены переменных и их производных имеем:

$$\frac{\partial \rho_O}{\partial \text{Fo}_\text{ш}} = \frac{\partial^2 \rho_O}{\partial \eta^2} - \frac{k_C H^2 ([\text{C}]_{\text{н}} - [\text{C}]_{\text{р}})}{D_{\text{э}}} \rho_O \rho_C, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_C}{\partial \text{Fo}_\text{ш}} = \frac{\partial^2 \rho_C}{\partial \eta^2} - \frac{b k_C L_O H^2}{D_{\text{э}}} \rho_O \rho_C, \quad (4)$$

где  $\text{Fo}_\text{ш} = D_{\text{э}} \tau / H^2$  – диффузионное число Фурье;

$k_C H^2 ([\text{C}]_{\text{н}} - [\text{C}]_{\text{р}}) / D_{\text{э}} = \text{Da}_{[\text{O}]}$ ,  $b k_C L_O H^2 / D_{\text{э}} = \text{Da}_{[\text{C}]}$  – одно из выражений числа Дамкелера.

Массообменные процессы с участием реакций определяются двумя числами Дамкелера [8], из которых первое  $\text{Da}_1$  является мерой отношения скорости расходования (образования) вещества к скорости конвективного переноса и второе  $\text{Da}_2$  – к скорости диффузионного переноса. Полученное в данном случае выражение числа Дамкелера можно считать обобщенным, так как  $D_{\text{э}}$  учитывает и молекулярный и конвективный переносы вещества. Приведение к безразмерному виду граничных условий дает число Шервуда  $Sh = b_{\text{ш}} H / D_{\text{э}}$ , широко используемое при обобщении массообменных процессов.

Определение величин чисел  $\text{Da}_{[\text{O}]}$  и  $\text{Da}_{[\text{C}]}$  для некоторых сталеплавильных процессов было произведено по данным математического моделирования [7]. На рис. 1 представлено их изменение при  $[\text{C}]_{\text{н}} = 1\%$  для обычного мартеновского процесса – кривая 1, мартеновского процесса с продувкой ванны кислородом – 2, процесса в двухванном сталеплавильном агрегате – 3 и кислородно-конвертерного процесса – 4. Как видно из рисунка, с уменьшением концентрации углерода ( $\rho_C$ ) оба числа возрастают, причем это увеличение заметнее для кислородно-конвертерного процесса. Близость числа  $\text{Da}$  к единице свидетельствует о приблизительно равенстве скоростей реакции и массообмена в таком процессе. Вместе с тем данные свидетельствуют, что при одинаковых начальных условиях с понижением  $\rho_C$  возрастает лимитирование рассматриваемых процессов переносом веществ, расходуемых на реакцию обезуглероживания.

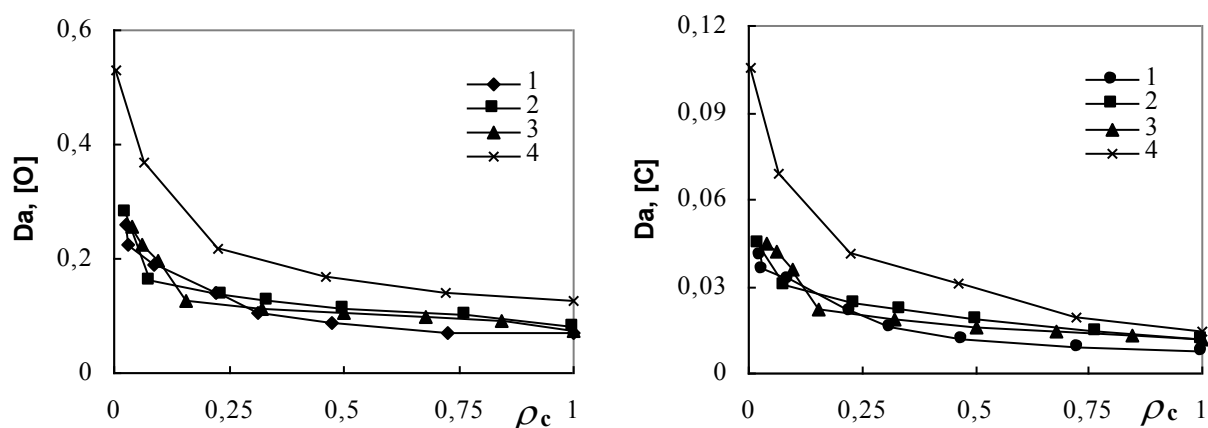


Рис. 1. Изменение чисел  $Da_{[O]}$  и  $Da_{[C]}$  для некоторых сталеплавильных процессов в зависимости от безразмерной концентрации углерода (обозначения в тексте)

При одновременном окислении других примесей, например, Si, Mn, P, и др., система (1) – (2) дополняется уравнениями

$$\frac{\partial [Si]}{\partial \tau} = D_3 \frac{\partial^2 [Si]}{\partial x^2} - k_{Si}[C] ([Si] - [Si]_p) , \quad (5)$$

$$\frac{\partial [Mn]}{\partial \tau} = D_3 \frac{\partial^2 [Mn]}{\partial x^2} - k_{Mn}[O] ([Mn] - [Mn]_p) , \quad (6)$$

$$\frac{\partial [P]}{\partial \tau} = D_3 \frac{\partial^2 [P]}{\partial x^2} - k_P[O] ([P] - [P]_p) , \quad (7)$$

где индекс «р» – обозначает концентрацию данного элемента, равновесную с концентрацией кислорода в металле или (FeO) в шлаке в зависимости от принятого механизма протекания реакции.

Эффективный коэффициент диффузии для всех элементов одинаков. Уравнения (1), а соответственно и (3), дополняются членами, описывающими скорости потребления кислорода на окисление указанных примесей. Если уравнение (3), дополненное членами, описывающими потребление кислорода на окисление Si, Mn, P, привести к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_o}{\partial Fo_d} = \frac{\partial^2 \rho_o}{\partial \eta^2} - \frac{k_C H^2 ([C]_H - [C]_P) \rho_C}{D_3} & \left( 1 + \frac{k_{Si} ([Si]_H - [Si]_P) \rho_{Si}}{k_C ([C]_H - [C]_P) \rho_C} + \right. \\ & \left. + \frac{k_{Mn} ([Mn]_H - [Mn]_P) \rho_{Mn}}{k_C ([C]_H - [C]_P) \rho_C} + \frac{k_P ([P]_H - [P]_P) \rho_P}{k_C ([C]_H - [C]_P) \rho_C} \right) , \end{aligned} \quad (8)$$

то многочлен в скобках представляет собой сумму относительных долей кислорода, расходуемого на окисление соответствующих примесей. В выражении (8) индексы «н» и «р» – начальная и равновесная концентрации элементов.

Так как  $D_3$  и  $H$  в конкретном процессе и агрегате одинаковы для всех примесей, то отношения скоростей потребления кислорода для их окисления не зависят от распределения

параметров по координатам. Следовательно, уравнение распределения кислорода на окисление примесей может быть записано как уравнение с сосредоточенными параметрами [9], а в описании распределения кислорода между окисляющимися примесями лучше использовать граничные условия второго рода. При этом на границе «металл – шлак» или «металл – реакционная зона» задается поток кислорода –  $I_{\text{общ}}$ , величина которого может быть постоянной или меняться во времени. В случае одновременного окисления C, Si, Mn, P уравнение распределения кислорода будет иметь вид

$$\partial[\text{O}] / \partial \tau = I_{\text{общ}} - k_c [\text{O}] ([\text{C}] - [\text{C}]_p) - k_{\text{Si}} [\text{O}] ([\text{Si}] - [\text{Si}]_p) - k_{\text{Mn}} [\text{O}] ([\text{Mn}] - [\text{Mn}]_p) - k_P [\text{O}] ([\text{P}] - [\text{P}]_p). \quad (9)$$

Практически во всех сталеплавильных процессах при содержании углерода выше 0,2–0,3 %, содержание кислорода в металле меняется незначительно, тогда  $\partial[\text{O}] / \partial \tau \cong 0$ , поток кислорода  $I_{\text{общ}}$  расходуется только на окисление примесей. После простых преобразований получим выражение для распределения кислорода между примесями

$$I_{\text{общ}} = k_c [\text{O}] ([\text{C}] - [\text{C}]_p) \cdot \left[ 1 + \frac{k_{\text{Si}}^{\odot} ([\text{Si}] - [\text{Si}]_p)}{([\text{C}] - [\text{C}]_p)} + \frac{k_{\text{Mn}}^{\odot} ([\text{Mn}] - [\text{Mn}]_p)}{([\text{C}] - [\text{C}]_p)} + \frac{k_P^{\odot} ([\text{P}] - [\text{P}]_p)}{([\text{C}] - [\text{C}]_p)} \right], \quad (10)$$

где  $k_{\text{Si}}^{\odot} = k_{\text{Si}} / k_c$ ;  $k_{\text{Mn}}^{\odot} = k_{\text{Mn}} / k_c$ ;  $k_P^{\odot} = k_P / k_c$  – относительные константы скоростей. Число Дамкелера по кислороду для углерода может быть записано в виде

$$\text{Da}_{[\text{O}], \text{C}} = [k_c H^2 ([\text{C}] - [\text{C}]_p) / D_{\odot}] \rho_c. \quad (11)$$

Аналогичные выражения имеют числа Дамкелера и для других окисляющихся примесей. После подстановки и соответствующих преобразований получаем выражение для безразмерного потока кислорода

$$I_{\text{общ}} H^2 / D_{\odot} [\text{O}] = \text{Da}_{[\text{O}], \text{C}} \rho_c + \text{Da}_{[\text{O}], \text{Si}} \rho_{\text{Si}} + \text{Da}_{[\text{O}], \text{Mn}} \rho_{\text{Mn}} + \text{Da}_{[\text{O}], \text{P}} \rho_P. \quad (12)$$

Таким образом, безразмерный поток кислорода, расходуемого на окисление примесей, равен сумме произведений чисел Дамкелера по кислороду для каждой примеси на ее безразмерную концентрацию. В то же время произведение числа Дамкелера на безразмерную концентрацию соответствующего элемента пропорционально доле кислорода, расходуемого на окисление этой примеси. Откуда из уравнений (10) и (11) следует:

$$I_i / I_{\text{общ}} = \text{Da}_{[\text{O}], i} \rho_i / \sum (\text{Da}_{[\text{O}], i} \rho_i), \quad i = \in (\text{C}, \text{Si}, \text{Mn}, \text{P}). \quad (13)$$

Для определения относительных потоков кислорода на окисление примесей был произведен анализ его потребления на окисление C, Si, Mn, P для большинства известных сталеплавильных процессов. При этом по литературным данным хода окисления примесей в различных сталеплавильных процессах рассчитали относительные константы скоростей потребления кислорода на их окисление. Анализ полученных значений констант скоростей показал, что для соответствующих примесей они близки практически во всех рассмотренных сталеплавильных процессах и могут быть описаны в форме уравнения Аррениуса.

На рис. 2 представлены рассчитанные по уравнению (13) относительные потоки кислорода для процессов: 1 – пудлинговый; 2 – томасовский; 3 – основной рудный мартеновский; 4 – передел высокофосфористых чугунов в качающихся мартеновских печах завода «Азов-сталь»; 5 – LD; 6 – OLP; 7 – бессемеровский; 8 – кислый мартеновский; обозначенное на рисунке

$$Da'_i = Da_{[O], i} \rho_i / \Sigma(Da_{[O], i} \rho_i).$$

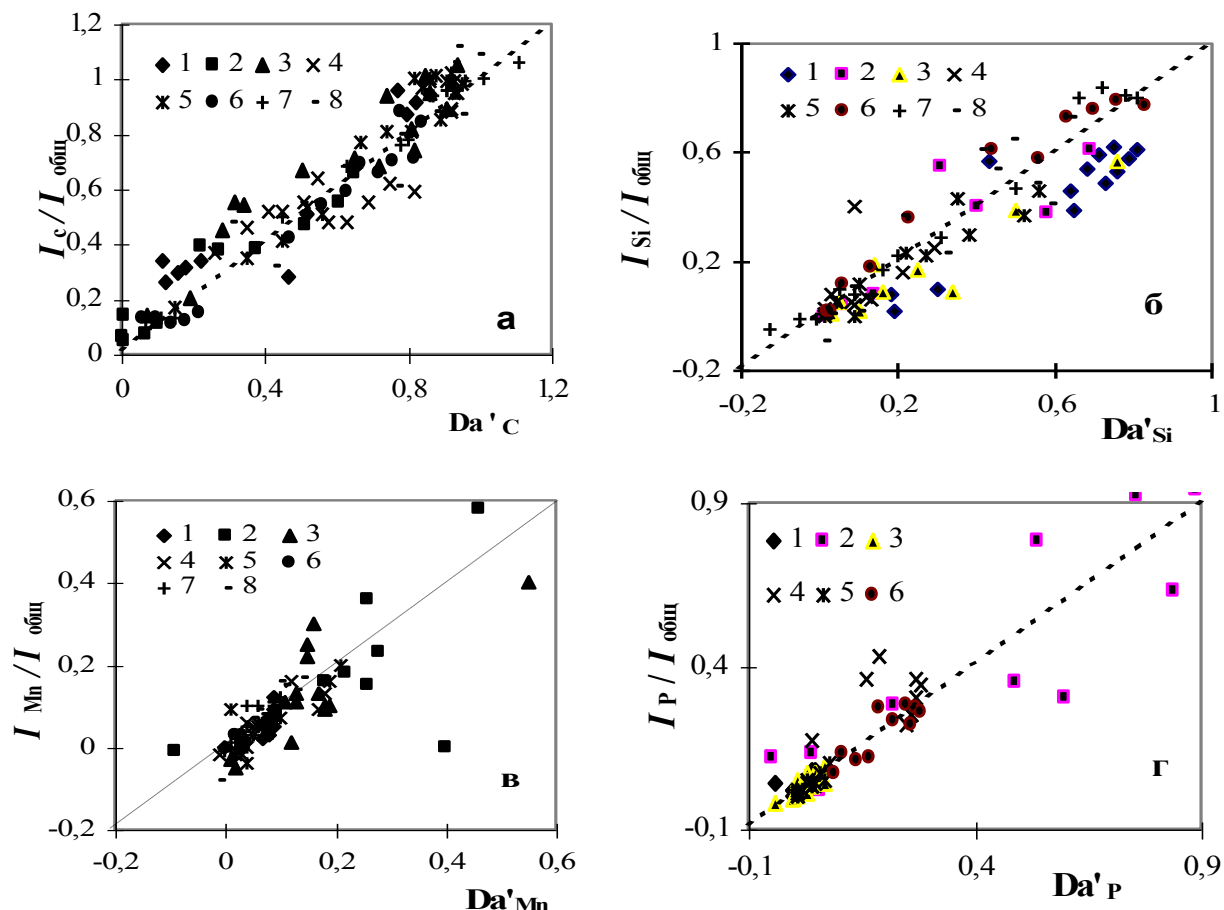


Рис. 2. Зависимость относительных потоков кислорода на окисление примесей в различных сталеплавильных процессах: а – С; б – Si; в – Mn; г – P (обозначения в тексте)

Из рисунка видно, что полученное уравнение (13), а следовательно и (12), могут быть использованы для описания окисления примесей практически во всех процессах с коэффициентом корреляции 0,87–0,95. Отклонения от полученных зависимостей наблюдаются для Si и P в томасовском процессе, что связано со сложностью математического описания начальной стадии процесса шлакообразования и, как следствие, трудностью определения концентрации фосфора, равновесной со шлаком.

В восстановительных металлургических процессах наиболее широко используется углеродотермическое восстановление. При его проведении в шахтных печах, работающих слюевым процессом, прямое восстановление осуществляется из жидких оксидных пленок, стекающих по кускам углеродистого восстановителя (кокса) [10]. В этом случае определяющее значение имеет поток углерода, расходуемого на восстановление различных элементов.

## Список использованных источников

1. Яковлев Ю. Н. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства // Научные труды ММИ. – М.: Metallurgy, 1991. – С. 32–44.
2. Глинков М. А. Тепловая работа сталеплавильных ванн. М.: Metallurgy, 1970. – 408 с.
3. Меджибожский. М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. Киев–Донецк: «Вища школа», 1986. – 279 с.
4. Шур А. Б., Бялый Л. А. Исследование распределения материалов перед задувкой мощной доменной печи // Сталь. 1963. № 6. С. 486–490.
5. Ковшов В. П., Петренко В. А., Верещак В. И. Моделирование доменного процесса. – Днепропетровск: Институт технологии. 1997. – 109 с.
6. Чернятевич А. Г., Зарвин Е. Я. К вопросу горячего моделирования кислородно-конвертерного процесса // Известия вузов. Черная металлургия. 1978. № 4. С. 40–46.
7. Яковлев Ю. Н. О математическом моделировании сталеплавильных процессов // Изв. АН СССР. Металлы. 1991. № 6. С. 197–201.
8. Брайнес Я. М. Подobie и моделирование в химической и нефтехимической технологии. М.: Гостопиздат, 1961. – 220 с.
9. Яковлев Ю. Н., Рывданская Т. В., Камкина Л. В., Сигарев Е. Н. Анализ различных динамических моделей процесса обезуглероживания и их использование при исследовании сталеплавильных процессов // Известия вузов. Черная металлургия. 1992. № 6. С. 65–68.
10. Яковлев Ю. Н., Камкина Л. В. Эффективность различных видов массообмена между твердыми и жидкими фазами в шахтных плавильных печах // Труды международной конференции «Экология и теплотехника – 1996» (2–5 июля). Днепропетровск: ГМетАУ, 1996. С. 308–309.

УДК 669.042

**Б. А. Капсалямов, А. С. Колесников**

Жезказганский университет имени О.А. Байконурова,

г. Жезказган, Республика Казахстан,

РГП на ПХВ «Южно-Казахстанский государственный университет

имени М. Ауэзова», г. Шымкент, Республика Казахстан

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ В ВАННЕ ПЕЧИ

### Аннотация

*В настоящей работе приведены результаты исследования распределения мощности в ванне модели прямоугольной руднотермической печи выплавки ферросилиция из техногенного отхода металлургической промышленности – клинкера вельцевания цинковых руд. Иссле-*